

振荡吸积盘的光变研究

欧建文 郑永刚 张雄

Research on the optical variability of oscillating disk

Ou Jian-Wen Zheng Yong-Gang Zhang Xiong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **63**, 239801 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.239801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.239801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/volumn/home.shtml>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[参数不确定的分数阶混沌系统广义错位延时投影同步](#)

李睿, 张广军, 姚宏, 朱涛, 张志浩

2014, 63(23): 230501. 全文: [PDF](#) (303KB)

[指向 Lyapunov 指数及其在单输入单输出系统故障检测中的应用](#)

杨东东, 马红光, 徐东辉, 刘浩淼

2014, 63(22): 220505. 全文: [PDF](#) (1741KB)

[基于扩张状态观测器的永磁同步电机混沌系统自适应滑模控制](#)

陈强, 南余荣, 邢科新

2014, 63(22): 220506. 全文: [PDF](#) (480KB)

[基于线性矩阵不等式的一类新羽翼倍增混沌分析与控制](#)

王斌, 薛建议, 贺好艳, 朱德兰

2014, 63(21): 210502. 全文: [PDF](#) (6399KB)

[耀变体 S5 0716+714 的混沌特性研究](#)

欧建文, 张皓晶, 郑永刚, 张雄

2014, 63(4): 049801. 全文: [PDF](#) (473KB)

# 振荡吸积盘的光变研究\*

欧建文 郑永刚 张雄†

(云南师范大学物理与电子信息学院, 昆明 650500)

(2014年6月26日收到; 2014年7月12日收到修改稿)

理论研究指出随机振荡吸积盘可能引起活动天体的光变, 然而观测数据分析表明光变中除了含有随机噪声外还存在混沌因素. 将混沌因素引入到随机振荡吸积盘中, 构成“混沌+随机”振荡吸积盘模型. 通过分析扰动的相图, 直观再现了混沌吸引子的状态. 研究表明: 在随机因素占主导时, 光变混乱无序; 随机因素与混沌因素相当时, 光变上下起伏类似于心电图; 混沌因素占主导时, 光变具有一定有序性. 模拟光变曲线的关联维与观测数据的关联维一致, 表明模拟光变曲线与观测结果之间存在内在联系.

**关键词:** 黑洞系统, 吸积盘, 混沌, 光变

**PACS:** 98.54.Cm, 98.62.Mw, 05.45.-a

**DOI:** 10.7498/aps.63.239801

## 1 引言

吸积盘理论<sup>[1-3]</sup>被广泛应用于解释巨型黑洞(如活动星系核与类星体)和恒星级黑洞(如微类星体或黑洞双星)等不同尺度的黑洞系统的辐射现象<sup>[4]</sup>. 研究指出, 这两种不同尺度的黑洞系统有着相似的物理环境和物理过程<sup>[5]</sup>, 且这些活动天体的光变现象与吸积盘的不稳定性密切相关<sup>[6-9]</sup>. 目前, 已有许多研究者对吸积盘的稳定性问题做了大量研究<sup>[10]</sup>. 最近, Harko和Mocanu<sup>[9]</sup>从广义相对论出发证明了致密天体周围环绕的介质能通过非引力作用(例如: 热浴)对吸积盘产生影响. 这种吸积盘可以利用一个含有黏滞项和随机项的广义朗之万型微分方程描述. 方程中黏滞项与吸积盘的内部性质有关, 随机项则表征外部随机因素的大小.

应用该模型, Mocanu和Marcu<sup>[11]</sup>对耀变体S5 0716+714的小时-天量级的变化(intra-day variability, IDV)观测数据和功率谱密度做出解释; Wang等<sup>[12]</sup>指出微分方程中的随机项可以产生随机共振, 共振峰可能是观测到的X射线双星的准周期振荡.

尽管随机振荡吸积盘模型对光变的解释取得

了一定成功, 但对观测数据的分析表明, 除了含有不可排除的随机噪声外, 光变中还存在着混沌因素<sup>[13-15]</sup>. 典型的观测事例是1992年Granat卫星观测发现的X射线微类星体GRS 1915+105的光变. 观测结果表明, GRS 1915+105的光变有时随机无序, 有时呈现周期性, 有时类似于“心电图”<sup>[16]</sup>. Misra等<sup>[17,18]</sup>用非线性时间序列分析(nonlinear time series analysis, NL TSA)方法计算了上述光变曲线的关联维数, 并以此为依据把光变归为三种类型: 随机型、混沌型和随机加混沌型; 同时, 他们推断GRS 1915+105的中心黑洞是一个混沌系统. 我们分析了S5 0716+714射电、光学和X波段的光变数据, 分别计算它们的关联维和李雅普诺夫指数, 两个混沌判据都表明三个波段均表现出很强的混沌特性<sup>[19]</sup>. 同样, 对S5 0716+714的IDV观测数据分析结果也表现出了混沌因素, 这表明混沌系统中时大时小的随机噪声导致了光变曲线的复杂性<sup>[20]</sup>. 因此, 这种看似随机但又蕴含某种变化规律的混沌现象可能在包括活动星系核和黑洞双星等的不同尺度的黑洞系统中广泛存在.

主要考虑随机因素的理论研究指出光变产生于随机振荡吸积盘<sup>[8,9,11]</sup>, 然而, 观测分析表明, 光变曲线不仅是随机噪声, 更可能是一种混沌现象.

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号: U1231203)、国家自然科学基金(批准号: 11163007, 11063004)、云南省自然科学基金(批准号: 2011FB041)、云南省引力理论创新团队和云南省高能天体物理创新团队资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: ynzx@yeah.net

为解决理论与观测结果的矛盾, 我们把混沌因素引入到随机振荡吸积盘中, 构成“混沌+随机”振荡吸积盘模型, 并将理论分析结果与观测数据做了对比.

## 2 基本方程

考虑一个环绕致密天体的标准薄盘, 它通过黏滞耗散和随机因素与外部介质发生作用, Harko 和 Mocanu [9] 严格证明了这种吸积盘可以用广义朗之万微分方程描述:

$$\frac{d^2\delta z}{dt^2} + cv\frac{d\delta z}{dt} + c^2\omega^2\delta z = c^2\xi(t), \quad (1)$$

式中,  $\delta z$  是振荡吸积盘的垂直微小位移;  $v$  是黏滞系数;  $\omega$  是吸积盘的固有频率;  $c, t$  分别是光速和时间;  $\xi(t)$  是随机白噪声, 只与时间有关且均值为 0.

单位质量吸积盘辐射的光度可以表示为由随机振荡和黏滞耗散引起的能量损失:

$$L(t) = cv\left(\frac{d\delta z}{dt}\right)^2 - c^2\frac{d\delta z}{dt}\xi(t), \quad (2)$$

(2) 式的详细推导参见文献 [9]. 为了解决理论与观测结果的矛盾, 我们把观测到的混沌因素引入到方程 (1) 的随机项  $\xi(t)$  中:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\delta z}{dt^2} + cv\frac{d\delta z}{dt} + c^2\omega^2\delta z \\ = c^2(a\xi + b\zeta) = c^2\eta(t). \end{aligned} \quad (3)$$

假设扰动  $\eta(t) = a\xi(t) + b\zeta(t)$ , 是随机噪声  $\xi(t)$  和混沌因素  $\zeta(t)$  的线性叠加, 其中  $a, b$  是常数, 分别表示随机因素和混沌因素的强弱, 此时  $\eta(t)$  依然是时间的函数, 但均值不一定为 0. 令  $\gamma = cv/2$ ,  $\omega_p = c\omega$ ,  $A = ac^2$ ,  $B = bc^2$ , 方程 (3) 可以简化为

$$\frac{d^2\delta z}{dt^2} + 2\gamma\frac{d\delta z}{dt} + \omega_p^2\delta z = A\xi(t) + B\zeta(t). \quad (4)$$

从方程 (4) 可以看出, 左边是一个简谐振动方程, 右边含有随机项和混沌项, 从而构成了一个“混沌+随机”振荡方程, 同样利用 (2) 式求出单位质量吸积盘的光度.

## 3 模型求解

采用四阶五级龙格-库塔法对 (4) 式进行求解, 结果表明, 当  $b = 0$  时, 即忽略混沌项时所求结果与文献 [8, 9, 11] 结果相同; 而当  $b \neq 0$  时, 由于扰动  $\eta(t)$  中存在混沌因素, 得到了新形式的数值解. 因此, 仔细研究  $\eta(t)$  的性质有助于深入了解“混沌+

随机”振荡吸积盘模型.  $\eta(t)$  是时间的函数, 在时域空间中可以分析得到各时刻所对应的特征参量, 但信息量有限. 为尽可能多地获得  $\eta(t)$  的演化信息, 我们将它重构于相空间中 [21, 22], 即将时间变量  $t \sim \eta(t)$  重构于  $\eta(t) \sim d\eta(t)/dt$  相空间中.

在  $\xi(t)$  是均值为 0 的高斯白噪声,  $\zeta(t)$  是 Lorenz 系统的条件下, 我们分别计算了: 随机因素占主导 ( $a = 1.0, b = 0.3$ ); 随机因素与混沌因素相当 ( $a = 1.0, b = 1.0$ ); 混沌因素占主导 ( $a = 0.3, b = 1.0$ ) 三种情况下  $\eta(t)$  在时域空间和相空间的演化情况, 结果如图 1 所示. 从图 1 (a)—(c) 可以看出, 在时域空间中, 三种情况看不出明显区别. 而在相空间中 (图 1 (d)—(f)), 随机因素占主导情况下 (图 1 (d)), 相空间紊乱, 相轨迹不断交叉重合, 由于存在 Lorenz 系统, 相图中依稀可以看出 Lorenz 吸引子的蝶形结构, 随着混沌因素的增加, 蝶形结构愈明显 (图 1 (e)), 最后在混沌因素占主导情况下 (图 1 (f)), 相轨迹除在初始点有扭结外, 轨道永不重复, 呈现明显的蝶形双螺旋线结构.

## 4 模拟光变曲线和观测值

GRS1915+105 是一个剧烈变化的微类星体, 自发现以来一直处于耀发状态, 是最明亮的 X 射线源之一 [23–25]. 已经确认它是一个黑洞双星, 主星质量约为  $14 M_\odot$ , 伴星质量约为  $1.2 M_\odot$  [26]. 由于银河系的消光作用, 一直未找到 GRS 1915+105 的光学对应体 [27]. 但 Granat, RXTE, Chandra, XMM-Newton 等多颗天文卫星对其监测获得了大量观测数据 [28–30], 它特有的 X 射线性质, 使该系统成为研究吸积盘-喷流结构的最佳天体.

Belloni 等 [31] 通过系统的研究, 把 GRS 1915+105 X 波段的光变曲线分为 12 类, 这 12 类光变曲线又根据色指数性质分为 A, B, C 三种基本状态. 处于 A, B 两种状态的光曲线有软谱, 对应着盘的稳定周期, 但 B 状态的温度比 A 状态的温度高; 处于 C 状态的光曲线有硬谱, 充满了白噪声, 对应盘中最靠近内部的不稳定区域 [24, 31]. Misra 等 [17, 18] 计算了这 12 类光变曲线的关联维, 并以饱和和关联维为判据, 给出 GRS 1915+105 X 波段的 12 类光变曲线中有 4 类光变曲线的关联维能达到饱和, 是一个低维混沌系统; 3 类光变曲线的关联维不能达到饱和, 是随机噪声; 其余 5 类光变曲线介于混沌与随机噪声之间, 是非随机系统, 即混沌叠加噪声.

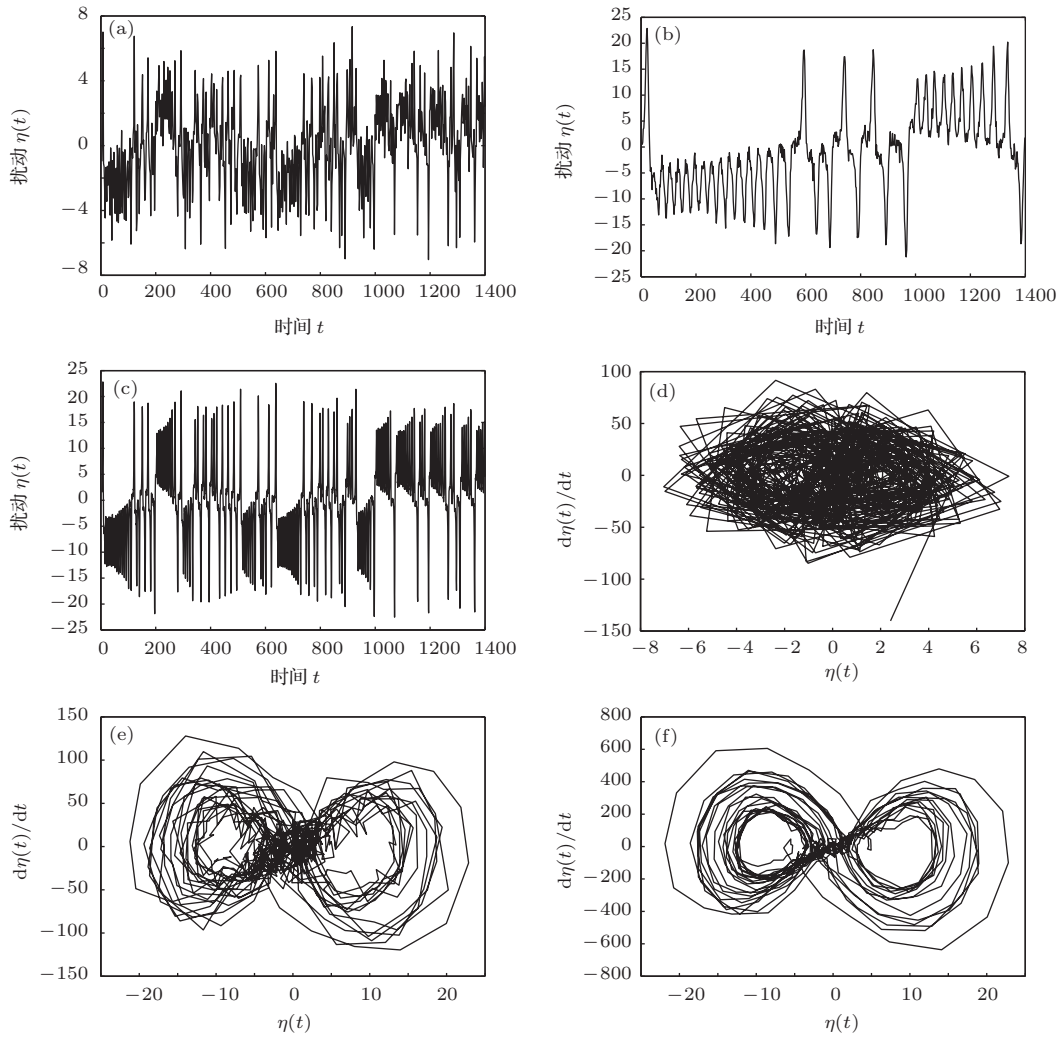


图1 三种不同情况下, 扰动  $\eta(t)$  ((a)—(c)) 及其相图 ((d)—(f)) (a), (d) 随机因素占主导; (b), (e) 随机与混沌因素相当; (c), (f) 混沌因素占主导

GRS 1915+105 的观测数据如图 2 (a)—(c) 所示, 分别为 Misra 划分的随机型、随机加混沌型、混沌型光变曲线. 基于上节假定的三种情况, 我们利用数值方法求解方程 (4) 并利用 (2) 式得到归一化的光变曲线结果, 如图 2 (d)—(f) 所示, 分别为随机因素占主导、随机与混沌因素相当、混沌因素占主导情况的模拟光变曲线. 从图 2 可以看出, 模拟光变曲线与观测数据有一定的相似度. 基于 Harko 等的理论推导和 Misra 等对观测结果的分析 [32,33], 我们认为, 方程 (1) 的随机项  $\xi(t)$  可能是混沌与随机因素的耦合  $\eta(t)$ . 这样, 在方程求解过程中, 混沌因素始终存在, 我们只要改变随机噪声在扰动中的比例即可产生三种不同类型的光变曲线.

### 5 光变曲线的关联维

为了定量分析模拟光变曲线与观测数据之间的相似度, 我们利用文献 [17] 的 NL TSA 方法计算

模拟光变曲线和观测数据的关联维, 结果如图 3 所示. 图 3 中, 离散点表示观测数据的关联维, 正方形、圆圈和三角形分别对应随机型、随机加混沌型、混沌型的关联维; 线型表示模拟光变曲线的关联维, 虚线、实线和点线分别表示随机因素占主导、随机与混沌因素相当、混沌因素占主导的关联维. 从图 3 可以看出, 观测数据与模拟光变曲线的关联维一致. 在混沌因素占主导的情况下, 关联维与 Lorenz 系统相似并且很快趋于饱和, 模拟光变曲线呈现出一定的有序性; 在随机因素占主导的情况下, 关联维与随机噪声类似, 模拟光变曲线呈现随机无规律变化; 在随机因素与混沌因素相当时, 关联维正好介于随机噪声与混沌系统之间, 模拟光变曲线也呈现出类似于“心跳”的一定的周期性. 由于关联维描述的是混沌吸引子的自相似结构, 可以清晰地区分出时间序列的随机噪声或混沌系统. 因此, 观测数据与模拟光变曲线的关联维一致表明,



模拟光变曲线与观测数据之间有着相似的内在动力学规律,而不是一种简单的巧合. 关联维方法进

一步证明了光变受混沌系统控制,同时受到时大时小的噪声影响,从而造成多种光变类型.

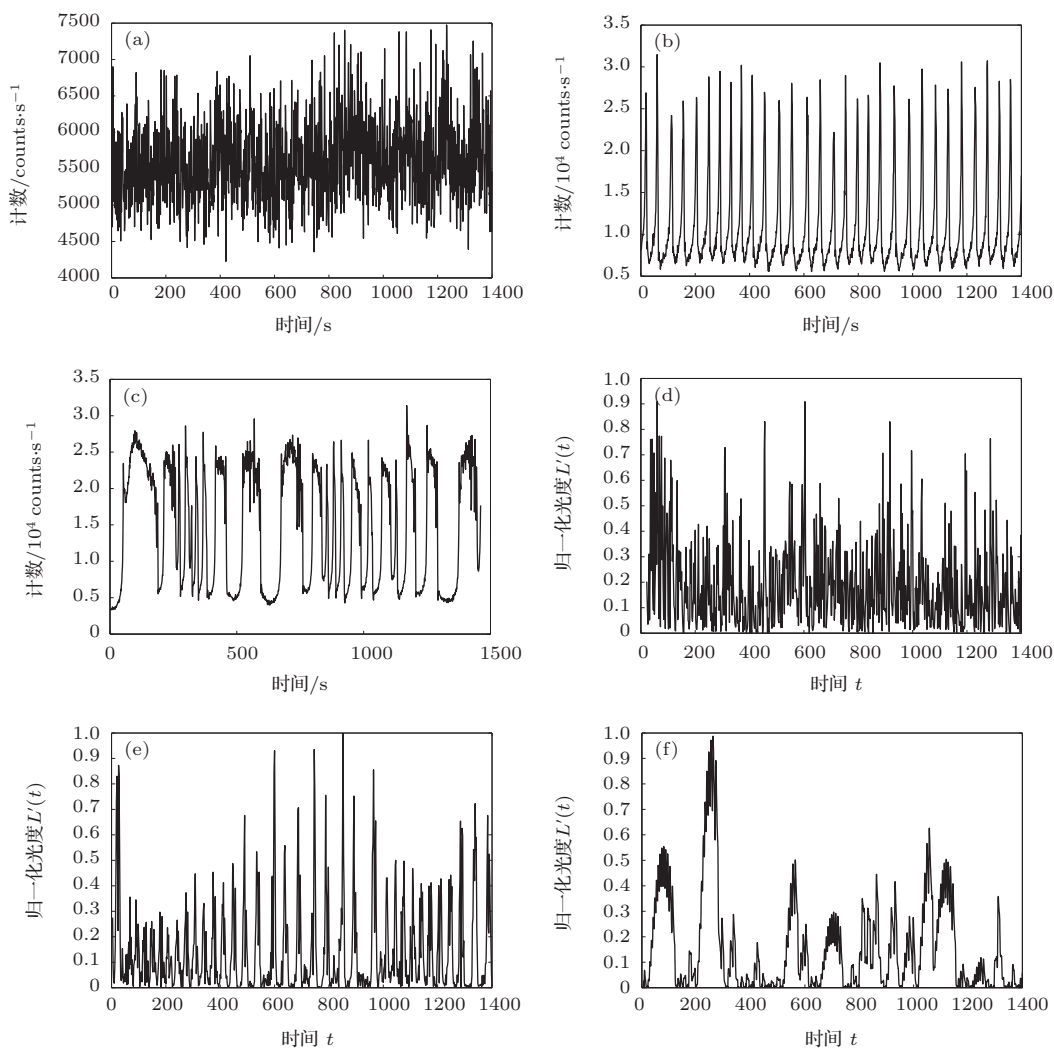


图2 GRS 1915+105的观测数据和模拟光变曲线 (a) 随机型, 观测数据; (b) 随机加混沌型, 观测数据; (c) 混沌型, 观测数据; (d) 随机因素占主导, 模拟光变曲线; (e) 随机与混沌因素相当, 模拟光变曲线; (f) 混沌因素占主导, 模拟光变曲线

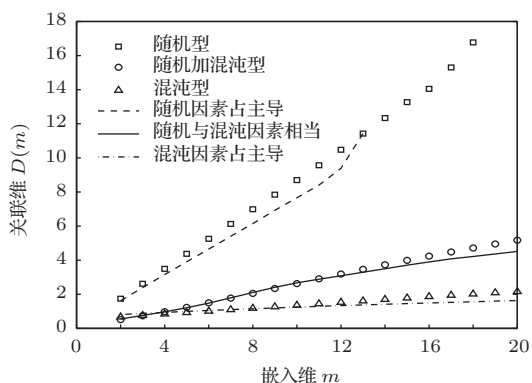


图3 模拟光变和观测数据的关联维

Belloni等<sup>[34,35]</sup>建立了黏滞-热不稳定(viscous-thermal instability)理论模型用于解释

GRS 1915+105的光变. 该模型认为, 在宁静态下, 吸积盘中存在一个半径为 $R_{\max}$ 的空洞, 洞内无任何吸积物质导致辐射微弱而未被探测到. 在稳定的吸积率 $\dot{M}_0$ 下, 空洞由外到内逐渐被填满. 随着物质积聚, 环状的吸积盘所受引力随之增加, 在某一时刻其中一环的引力达到临界点, 物质被吸积落下并引起内环的连锁反应, 此时的吸积率 $\dot{M} > \dot{M}_0$ , 于是观测到耀发. 耀发结束后内环燃料耗尽, 吸积关闭而返回到 $\dot{M} < \dot{M}_0$ 的情况, 重新形成一个新的空洞. 循环不断进行, 于是观测到X射线的规律性耀发. Yonehara和Mineshige<sup>[36]</sup>也认为吸积盘是一个自组织结构的盘, 并从中产生微小的混沌扰动, 当密度超过某一临界值时触发盘的“雪崩”而

导致耀发. Titarchuk 和 Osherovich<sup>[37]</sup> 则认为, 中心致密天体对盘的引力充当了盘振荡的“弹性回复力”, 盘密度分布的大小影响了吸积盘的振荡频率, 并以此解释了多个 X 射线双星的低频准周期振荡. 尽管我们不知道盘中某个具体位置的物质吸积的过程, 但如果将吸积盘作为一个整体, 而把局部变化视为扰动, 则可以构建一个随机振荡吸积盘模型<sup>[9,35-37]</sup>.

## 6 结 论

基于观测数据分析出含有混沌因素, 本文把 Lorenz 吸引子引入到随机振荡吸积盘模型的随机项中, 并计算了随机因素占主导、随机因素与混沌因素相当、混沌因素占主导三种情况下扰动项  $\eta(t)$  的  $\eta(t) \sim d\eta(t)/dt$  相图, 直观地再现了扰动的混沌吸引子状态. 在随机因素占主导的情况下, 模拟光变曲线混乱无序, 随机性强; 在随机因素与混沌因素相当的情况下, 光变上下起伏类似于心电图; 在混沌因素占主导的情况下, 呈现出一定有序性. 最后, 通过分析模拟光变与观测数据的关联维, 发现二者数值非常接近, 表明它们存在内在联系. 然而什么情况下随机因素占主导、或混沌因素占主导、或二者相当, 它们是如何导致 X 射线的变化, 物理过程又是如何等问题还有待深入研究<sup>[10,38-40]</sup>.

感谢意大利 Osservatorio Astronomico di Brera 天文台 Belloni 教授提供详尽的 GRS 1915+105 观测数据!

## 参考文献

- [1] Shakura N I, Sunyaev R A 1973 *Astron. Astrophysics* **24** 337
- [2] Novikov I D, Thorne K S 1973 *Black Holes* (New York: Gordon and Breach) p343
- [3] Lynden-Bell D, Pringle J E 1974 *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **168** 603
- [4] Sun W H, Malkan M A 1989 *Astrophys. J.* **346** 68
- [5] Wang D X 2007 *Prog. Astron.* **25** 193 (in Chinese) [汪定雄 2007 天文学进展 **25** 193]
- [6] Ye Y C, Wang D X, Gong X L 2005 *Chin. Phys.* **14** 439
- [7] Kelly B C, Sobolewska M, Siemiginowska A 2011 *Astrophys. J.* **730** 52
- [8] Leung C S, Wei J Y, Harko T, Kovacs Z 2011 *J. Astrophys. Astron.* **32** 189
- [9] Harko T, Mocanu G 2012 *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **421** 3102
- [10] Abramowicz M A, Fragile P C 2013 *Living Rev. Relat.* **16** 1
- [11] Mocanu G, Marcu A 2012 *Astron. Nachr.* **333** 166
- [12] Wang Z Y, Chen P J, Zhang L Y 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 099801
- [13] Harikrishnan K P, Misra R, Ambika G 2011 *Res. Astron. Astrophys.* **11** 71
- [14] Emmanoulopoulos D 2007 *Ph. D. Dissertation* (Heidelberg: Ruperto-Carola University of Heidelberg)
- [15] Karak B B, Dutta J, Mukhopadhyay B 2010 *Astrophys. J.* **708** 862
- [16] Neilsen J, Remillard R A, Lee J C 2011 *Astrophys. J.* **737** 69
- [17] Misra R, Harikrishnan K P, Mukhopadhyay B, Ambika G, Kembhavi A K 2004 *Astrophys. J.* **609** 313
- [18] Misra R, Harikrishnan K P, Ambika G, Kembhavi A K 2006 *Astrophys. J.* **643** 1114
- [19] Ou J W, Zhang H J, Zheng Y G, Zhang X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 049801 (in Chinese) [欧建文, 张皓晶, 郑永刚, 张雄 2014 物理学报 **63** 049801]
- [20] Li S H, Ou J W, Liu Z 2014 *J. Astrophys. Astron.* **35** 183
- [21] Zhang S P, Xie C S, Hu M L, Li H Y, Bai Z K, Zeng D W 2008 *Sens. Actuat. B* **132** 81
- [22] Zhang S P, Xie C S, Li H Y, Bai Z K, Xia X P, Zeng D W 2009 *Sens. Actuat. B* **135** 552
- [23] Chen X M, Swank J H, Taam R E 1997 *Astrophys. J.* **477** L41
- [24] Fender R, Belloni T 2004 *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **42** 317
- [25] Neilsen J, Lee J C 2009 *Nature* **458** 481
- [26] Greiner J, Cuby J G, McCaughrean M J 2001 *Nature* **414** 522
- [27] Mirabel I F, Rodriguez L F 1994 *Nature* **371** 46
- [28] Castro-Tirado A J, Brandt S, Lund N, Lapshov I, Sunyaev R A, Shlyapnikov A A, Guziy S, Pavlenko E P 1994 *Astrophys. J. Suppl. S.* **92** 469C
- [29] Naik S, Agrawal P C, Rao A R, Paul B 2002 *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **330** 487
- [30] Li S P, Zhang H J, Zhang X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 089801 (in Chinese) [李孝攀, 张皓晶, 张雄 2011 物理学报 **60** 089801]
- [31] Belloni T, Klein-Wolt M, Méndez M, van der Klis M, van Paradijs J 2000 *Astron. Astrophys.* **355** 271
- [32] Harikrishnan K P, Misra R, Ambika G, Kembhavi A K 2006 *Physica D* **215** 137
- [33] Liu S D, Liang F M, Liu S K, Xin G J 2003 *Chaos and Fractal in Natural Sciences* (Beijing: Peking University Press) p35 (in Chinese) [刘式达, 梁福明, 刘式适, 辛国君 2003 自然科学中的混沌和分形 (北京: 北京大学出版社) 第 35 页]
- [34] Belloni T, Méndez M, King A R, van der Klis M, van Paradijs J 1997 *Astrophys. J.* **479** L145
- [35] Belloni T, Méndez M, King A R, van der Klis M, van Paradijs J 1997 *Astrophys. J.* **488** L109
- [36] Yonehara A, Mineshige S 1997 *Astrophys. J.* **486** 388
- [37] Titarchuk L, Osherovich V 2000 *Astrophys. J.* **542** L111
- [38] Li H L, Lin R, Cheng L Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 050402
- [39] Chen J H, Wang Y J 2011 *Chin. Phys. B* **20** 030401
- [40] Zeng X X, Zhou S W, Liu W B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 090402

# Research on the optical variability of oscillating disk\*

Ou Jian-Wen Zheng Yong-Gang Zhang Xiong<sup>†</sup>

(School of Physics and Electronic Information Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

( Received 26 June 2014; revised manuscript received 12 July 2014 )

## Abstract

Theoretical study shows that stochastic oscillations of an accretion disk should induce the variability of active objects, however, observations indicate that it contains both chaotic factor and random noise. We develop a “chaotic + stochastic” oscillating accretion disk model for the variability. In this model, the chaotic factor is introduced into the oscillating accretion disk, and the chaotic attractor is reproduced through analyzing the phase pattern of disturbance. Results show that: when the random factor dominates the variability, the light curve exhibits a strong randomness; when the random factor is equal to the chaotic factor, the light curve shows a “heartbeat” which is similar to an electrocardiogram; when the chaotic factor dominates the variability, the light curve shows a certain orderliness. The correlated dimension of the simulated light curve is consistent with the correlated dimension of observational data. This suggests that there is an intrinsic relationship between the simulated light curve and observational data.

**Keywords:** black hole system, accretion disk, chaos, optical variability

**PACS:** 98.54.Cm, 98.62.Mw, 05.45.-a

**DOI:** [10.7498/aps.63.239801](https://doi.org/10.7498/aps.63.239801)

---

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1231203), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11163007, 11063004), the Natural Science Foundation of Yunnan Province, China (Grant No. 2011FB041), the Gravitational Theory Innovation Team of Yunnan Provincial of China, and the High Energy Astrophysics of University Innovation Team of Yunnan Provincial of China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [ynzx@yeah.net](mailto:ynzx@yeah.net)